

## ساخت نانوکامپوزیت فریت نیکل - مس بر پایه گرافن

فریدون بابائی، بهزاد انگوتی

گروه فیزیک، دانشگاه قم

(دریافت مقاله: ۹۷/۰۵/۰۶ - پذیرش مقاله: ۹۸/۱۲/۲۰)

### چکیده

نانوفریت‌های نیکل - مس با نسبت‌های وزنی متفاوت توسط روش احتراقی سنتز شد. با استفاده از روش لایه‌برداری از پودر میکرونی گرافیت در فاز مایع، گرافن تهیه شد. گرافن به دست آمده با آنالیز رامان مورد بررسی قرار گرفت. سپس گرافن با نانوفریت‌های نیکل - مس به منظور تهیه نانوکامپوزیت‌های نیکل - مس بر پایه گرافن ترکیب شد. خواص اپتیکی، ساختاری و مغناطیسی نانوکامپوزیت‌ها توسط آنالیزهای XRD، FTIR، SEM، UV-VIS و VSM بررسی شد. طیف‌های پراش XRD تشکیل نانوذرات با ساختار اسپینل مکعبی را آشکار کرد و همچنین تشکیل فاز فریت با توجه به نتایج FTIR مربوط به مد ارتعاشی یون‌های Fe واقع در مکان چهار وجهی شبکه با اکسیژن نیز قابل تایید است. تصاویر میکروسکوپی SEM حاکی از خلل و فرج زیاد نانوکامپوزیت‌ها را نشان داد که بیان می‌کند این ساختارها مساحت سطحی بزرگ دارند که در به دام انداختن ویروس‌ها و باکتری‌ها مفید است. این مطالعه می‌تواند در پژوهش‌های فوتوترمال تراپی نیز کاربرد داشته باشد. واژه‌های کلیدی: نانوکامپوزیت، فریت، احتراقی، لایه برداری از فاز مایع.

## Fabrication of Nickel - Copper Ferrite Nanocomposite Based on Graphene

Ferydon Babaei, Behzad Angouti

Department of Physics, University of Qom

(Received 28 July 2018, accepted 10 March 2020)

### Abstract

Nickel-copper nanoferrites with different weight ratios were synthesized by combustion method. Graphene was prepared from microporous graphite powder using liquid phase exfoliation. The obtained graphene was analysed by Raman spectra. Then graphene was combined with nickel-copper nanoferrites to prepare nickel-copper nanocomposites based on graphene. The optical, structural and magnetic properties of nanocomposites were investigated by analyses of XRD, FTIR, SEM, UV-VIS and VSM. The XRD diffraction patterns revealed the formation of nanoparticles with cubic spinel structure, and the formation of the ferrite phase can be confirmed according to the FTIR results of the vibrational mode of the Fe ions located at the quadrilateral position of the oxygen-oxygen lattice. The SEM microscopic images showed more porosities in nanocomposites that indicate these structures have a large surface area that is useful in trapping viruses and bacterias. Also this study could be used in photothermal therapies research.

**Keywords:** Nanocomposite; ferrite; combustion, liquid phase exfoliation.

**E-mail of Corresponding author:** fbabaei@qom.ac.ir.

## مقدمه

متفاوت  $x=0,0.3,0.5,0.7,1$  استفاده شدند، در شکل ۱ (الف) -  
 (د) نشان داده شده است که عبارتند از: نیترات نیکل ۶ آبه  $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ، نیترات مس ۳ آبه  $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ ، نیترات آهن ۹ آبه  $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ، سوخت گلايسين  $C_2H_5NO_2$  و آب مقطر. به عنوان مثال به ازای  $x=0.7$  ترکیب مورد نظر به صورت  $Ni_7Cu_3Fe_2O_4$  است. از آنجایی که جرم‌های مولی مس، نیکل و آهن خیلی بزرگ است (جرم مولی تمام ترکیب‌ها را با استفاده از جدول تناوبی می‌توان به دست آورد)، ترکیب فوق به ازای  $0.3$  مول مس،  $0.7$  مول نیکل و  $2$  مول آهن سنتز نشد. دلیل آن استفاده کم از مواد خام بود و این نسبت‌های مواد خام در سنتز رعایت شد. به همین منظور تمامی نسبت‌ها  $400$  برابر کوچک شدند. با در نظر گرفتن این مطلب نسبت‌های مواد خام در سنتز برای  $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ ،  $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  و  $Ni_7Cu_3Fe_2O_4$  بترتیب  $0.18$ ،  $0.51$  و  $2.02$  گرم بودند. بعد از سائیدن تمامی مواد ذکر شده، آنها در داخل یک بشر ریخته شد. از گلايسين  $C_2H_5NO_2$  به عنوان سوخت استفاده شد. مقدار گرم سوخت مصرفی معمولاً اختیاری می‌باشد ولی در اینجا از نسبت نیترات به گلايسين برابر  $0.5$  برای محاسبه سوخت مورد نیاز استفاده شد. به عبارت دیگر ابتدا مقدار مول مصرفی نیترات در ظرف حاوی نمونه حساب شده و با قرار دادن آن در رابطه‌ی  $0.5 = \frac{mol(C_2H_5NO_2)}{mol(NO_3^-)}$ ، میزان سوخت به دست آمد. مقدار نیترات بر حسب مول  $0.2$  مول و مقدار سوخت (گلايسين) بر حسب مول  $0.1$  مول خواهد بود. از جرم مولی گلايسين، مقدار سوخت  $0.75$  گرم بدست آمد. با اضافه کردن  $20$  میلی لیتر آب مقطر به داخل بشر، محلول حاصل به مدت نیم ساعت بر روی هیتر و تحت دمای  $300$  درجه ی سانتی گراد قرار گرفت. در ابتدا آب درون بشر تبخیر شده و پس از تقریباً  $25$  دقیقه احتراق خود به خودی رخ می‌دهد و در عرض چند ثانیه ماده ی خاکستری تیره رنگ شکننده و متخلخلی به وجود می‌آید که همان فریت مورد نظر است. نانو فریت‌های نیکل-

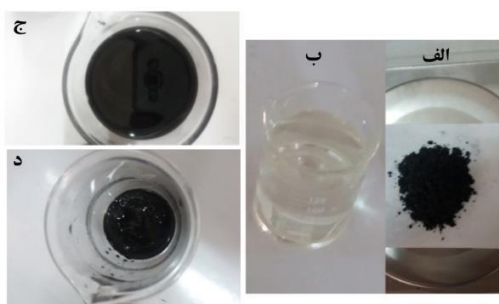
ویژگی برجسته ی فریت‌ها که آن‌ها را برای بسیاری از کاربردها مناسب کرده است مقاومت ویژه ی الکتریکی بالای آن‌ها در مقایسه با سایر فلزات است. مقاومت ویژه ی الکتریکی آن‌ها در محدوده ی  $10^4 - 10^7 \Omega m$  است، در حالی که این عدد برای آهن  $10^{-4} \Omega m$  است [۱]. یکی از روش‌های ارزان، سریع و مقرون به صرفه برای سنتز فریت‌ها روش احتراقی می‌باشد. این روش بر پایه ی واکنش گرمای شدید بین پودرهای اولیه استوار است. دمای احتراق نهایی بالاست (بیشتر از  $1000$  درجه ی سانتی گراد) و در زمان کوتاهی واکنش اتفاق می‌افتد و همچنین سرمایش در این نوع واکنش‌ها با سرعت زیاد روی می‌دهد. سوخت، اکسید کننده و دمای احتراق سه پارامتر مهم این روش می‌باشند و گرما، نور و خاکستر محصولات تولید شده می‌باشند [۲ و ۳].

در فوتو ترمال تراپی که بعضی مواقع طیف سنجی نزدیک مادون قرمز نیز نامیده می‌شود از نانو کامپوزیت‌های فریت نیکل- مس - گرافن استفاده می‌شود. تهیه فریت‌های نیکل- مس بر پایه گرافن سبب می‌شود که شدت سیگنال جذبی به دست آمده از اسپکترو فوتومتر بالا باشد که در تشخیص سرطان از اهمیت بالایی برخوردار است [۴ و ۵]. دستیابی به این فناوری در کشور می‌تواند ارز آوری بالایی داشته باشد. در این پژوهش، فریت‌های نیکل- مس به روش احتراقی با درصد‌های وزنی متفاوت به روش احتراقی ساخته شد. سپس آنها با گرافن سنتز شده به روش لایه برداری از فاز مایع از پودر میکرونی گرافیت برای تهیه ساخت نانو کامپوزیت فریت نیکل- مس بر پایه گرافن ترکیب شدند و خواص ساختاری، اپتیکی و مغناطیسی آنها مورد تحقیق و مطالعه قرار گرفته است.

## روش آزمایش

مواد خامی که در روش احتراقی برای سنتز فریت‌های نیکل- مس  $Ni_xCu_{1-x}Fe_2O_4$  با در صد‌های وزنی

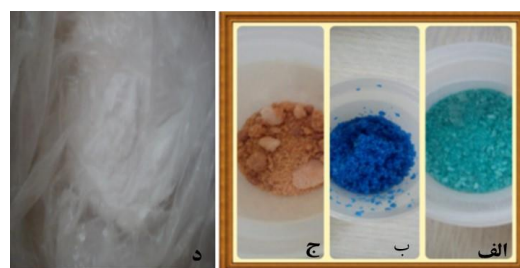
می‌شوند. مرحله سوم: در این مرحله مواد ته نشین شده در ظرف را به دور ریخته و فقط موادی که در بالای محلول بود به ظرف دیگری منتقل شد. علت انجام این کار حذف گرافیت حل نشده و گرافن‌های چند لایه رسوب شده در ته ظرف می‌باشد. پس از آن نمونه توسط فیلتر PVP (Polyvinylpyrrolidone) با قدرت تفکیک ۰/۲ میکرومتر صاف شد و در انتها چیزی که باقی می‌ماند، گرافن پخش شده در متیل پیرولیدن می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲. الف: پودر گرافیت. ب: محلول شفاف متیل پیرولیدن. ج: گرافن‌های تشکیل شده بر روی محلول. د: گرافن‌های تشکیل شده در ته بشر با ضخامت بیشتر.

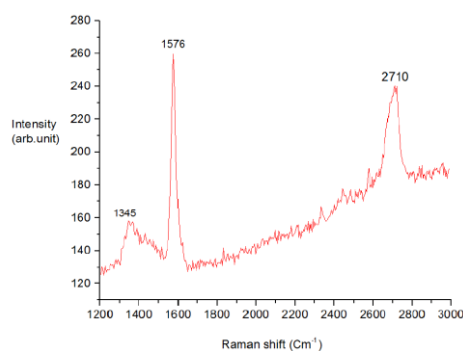
نانو فریت‌های سنتز شده را به مقدار کافی در بشرهای حاوی گرافن اضافه کرده و آن‌ها را به مدت ۱۰ دقیقه درون آلتراسونیک گذاشته تا نانو ذرات روی صفحات گرافن رسوب کنند و همچنین یک محلول همگنی بدست آید. خواص ساختاری، اپتیکی و مغناطیسی نانوکامپوزیت‌ها توسط آنالیزهای FTIR، UV، XRD، SEM، VSM و گرافن تهیه شده توسط رامان مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. برای انجام آزمایش و بررسی نانو کامپوزیت‌ها، تمامی نمونه‌ها که به صورت محلول در متیل پیرولیدن شناور هستند خشک شدند (فقط برای گرفتن آنالیز UV از نمونه محلول استفاده شد). الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌ها با دستگاه Philips X-ray diffractometer با تابش Cu K $\alpha$  در طول موج ۱/۵۴ انگستروم تحلیل شد. بررسی ریخت‌شناختی پودرها با استفاده از تصاویر FESEM (مدل Hitachi S4160) انجام شد. بررسی خواص مغناطیسی توسط دستگاه VSM (ساخت دانشگاه کاشان) تحت

مس به ازای X‌های دیگر هم به همین ترتیب ساخته شد. البته همان‌طور که مشخص است، به دلیل عدم وابستگی آهن به مقدار نیترات آهن در تمامی نمونه‌های دیگر هم همان ۲/۰۲ گرم می‌باشد. همچنین مقدار نیترات مصرف شده در تمام نمونه‌ها هم ثابت باقی می‌ماند که به این معناست که سوخت مصرفی هم در در تمامی مراحل این آزمایش با یکدیگر برابر و به اندازه ۰/۷۵ گرم می‌باشد.



شکل ۱. الف:  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . ب:  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . ج:  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ . د:  $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$

برای تولید گرافن از روش لایه برداری از فاز مایع از پودر میکرونی گرافیت استفاده شد که مراحل سنتز بصورت زیر بود. مرحله اول: شامل مرطوب کردن ذرات میکرونی گرافیت به وسیله ی مولکول‌های NMP (N-Methyl Pyrrolidone) است. برای این منظور ۱/۵ گرم پودر گرافیت داخل ۱۵۰ میلی لیتر محلول متیل پیرولیدن ریخته شد (شکل ۲) و محلول حاصل به مدت ۳ ساعت بر روی آلتراسونیک با توان ۵۰ وات قرار داده شد. در طی این مرحله مولکول‌های متیل پیرولیدن به سطح و لبه‌ی گرافیت می‌چسبند و همچنین با ایجاد لرزش‌هایی که توسط آلتراسونیک صورت می‌گیرد به درون لایه‌های گرافیت نفوذ می‌کنند. مرحله دوم: در این مرحله محصول مورد نظر به مدت ۱۰ روز در آزمایشگاه و در جایی که کوچکترین لرزشی نبود، نگهداری شد. در طی این مدت مولکول‌های متیل پیرولیدن بر نیروی واندروالس بین لایه‌ها غلبه می‌کنند و باعث جدا شدن لایه‌های گرافیت از هم



شکل ۳. طیف رامان گرافن .

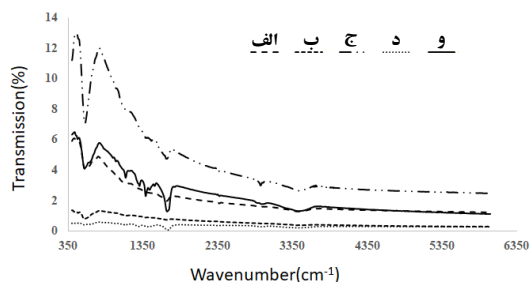
برای بررسی آنالیز UV بر روی نمونه‌ها در دمای اتاق، ابتدا نمونه‌ها به وسیله‌ی مخلوط الکل و آب مقطر رقیق شدند تا منحنی‌هایی با قدرت تفکیک بیشتری به دست آید. در شکل ۴ (الف - و) منحنی‌های حاصل از این آنالیز بر روی نمونه‌ها مشخص شده است. پیک بزرگی که در طول موج‌های کمتر از ۳۰۰ نانومتر در تمام نمونه‌ها مشخص است، مربوط به انتقال الکترون از اوربیتال غیر پیوندی n به اوربیتال ضد پیوند  $\Pi^*$  ( $n \rightarrow \Pi^*$ ) در پیوند دوگانه بین اتم‌های کربن و اکسیژن (C=O) در اکسید گرافن نسبت داده می‌شود که در تطابق کامل با تحقیقات انجام شده در گذشته می‌باشد [۹]. همچنین پیک‌های کوچکی که در ۵۰۰-۸۰۰ نانومتر دیده می‌شود که مربوط به تحریک الکترون از سطح 2p به 3d در آهن در ترکیبات اسپینلی می‌باشد. در طول موج‌های مختلف، دامنه‌های متفاوتی وجود دارد که با هم برابر نیستند و این تفاوت می‌تواند به انتقال الکترون بین یون‌های اکسیژن و کاتیون‌ها منسوب باشد.

فرکانس ۲۵ هرتز صورت گرفت. آنالیز FTIR توسط طیف سنجی مادون قرمز مدل VERTEX 70 و طیف سنجی UV-Vis توسط اسپکتروفوتومتری دوباریکه‌ای Hitachi U-3501 انجام شدند. گرافن ساخته شده توسط میکروسکوپ رامان با مشخصات شرکت تولید کننده: Teksan، مدل: P50C0R10 Takram، طول موج لیزر: ۵۳۲ nm و بازه بر حسب شیفت رامان:  $100-4400 \text{ cm}^{-1}$  آنالیز شد.

### بحث و نتایج

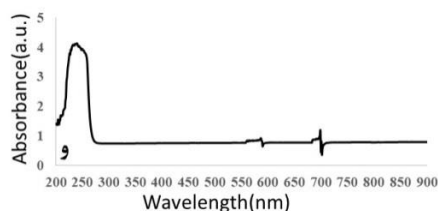
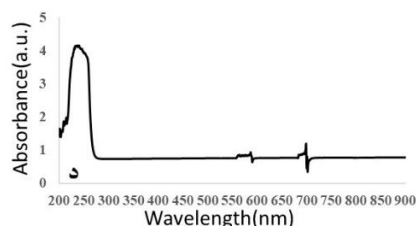
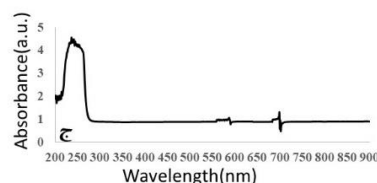
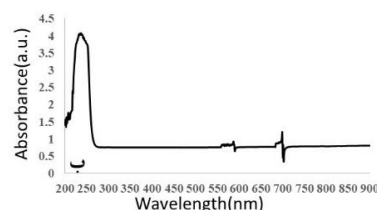
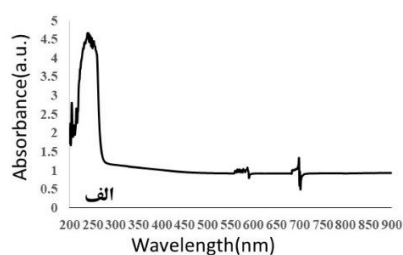
طیف رامان از گرافن سنتز شده در شکل ۳ نمایش داده شده است. طیف رامان نتیجه‌ی پراکندگی ناکشسان فوتون‌های ورودی است که به وسیله‌ی ارتعاشات فونون‌های شبکه رخ می‌دهد. پیکی که در  $1345 \text{ cm}^{-1}$  ملاحظه می‌شود، مربوط به الماس است و به اختصار به نوار D معروف است که به دلیل حضور کربن گرافیتی معیوب و اختلال در نمونه و نیز به علت حضور آشفته‌گی‌ها و نواقص ساختار شبکه است. پیکی که در  $1576 \text{ cm}^{-1}$  دیده می‌شود مربوط به گرافیت است و به اختصار نوار G می‌نامند که ناشی از لرزش اتم‌های کربن مماسی در ساختار  $SP^2$  است. پیک سومی در  $2710 \text{ cm}^{-1}$  به 2D معروف است و به تعداد لایه‌های گرافن تشکیل شده مربوط می‌شود. نسبت شدت نوار D به G ( $I_D/I_G$ ) نشان‌دهنده‌ی آشفته‌گی و بی‌نظمی بیشتر و رشد عیوب در طول فرایند حرارت است و یک شاخصه‌ی مفید برای ارزیابی ساختار بلوری منظم و نامنظم از مواد مبتنی بر کربن است. در اکسید گرافن واقعی این مقدار ۰/۹۲ می‌باشد، در حالی که برای اکسید گرافنی که در اینجا ساخته شد، این مقدار ۰/۶ بدست آمد. نتایج به دست آمده با نتایج کار دیگران سازگاری کامل دارد [۸-۶]

محل هشت وجهی شبکه با اکسیژن است و این بیانگر تشکیل فاز اسپینلی فریت نیکل مس است [9]. پیک هایی که در محدوده بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰  $\text{cm}^{-1}$  وجود دارد، مربوط به پیوند C-O برای تشکیل اکسید گرافن است. پیک هایی که در محدوده ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰  $\text{cm}^{-1}$  مربوط به پیوندهای ارتعاشی - کششی C=O از گروه های COOH است. همچنین پیک پهنی که در منطقه ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰  $\text{cm}^{-1}$  وجود دارد می توان به پیوندهای هیدروژن از گروه OH بر روی فنول های آروماتیک و یا کربوکسیلیک اسیدها نسبت داد.



شکل ۵. طیف های FTIR الف:  $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{GO}$ ، ب:  $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{GO}$ ، ج:  $\text{Ni}_7\text{Cu}_3\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{GO}$ ، د:  $\text{Ni}_5\text{Cu}_5\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{GO}$ ، و:  $\text{Ni}_3\text{Cu}_7\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{GO}$

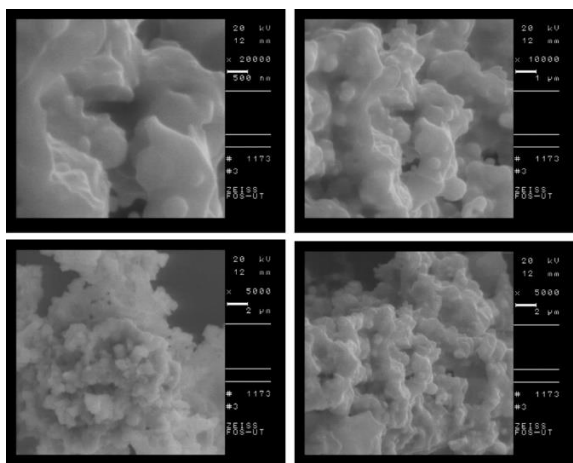
اندازه و شکل نانوذرات سنتز شده همراه با گرافن، با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی نشر میدانی (FESEM) مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که در شکل های ۶ تا ۱۰ مشخص شده است، پراکندگی نانوذرات در سطح گرافن و در میان لایه های گرافن از تصاویر FESEM به خوبی آشکار است. نانوذرات ها به هیچ وجه در خارج از محدوده سی صفحات گرافن نیستند که این نشان از پیوند قوی بین نانوذرات و صفحات گرافن دارد. این پدیده به این دلیل است که نانوصفات گرافن نقش یک سلول قابل انعطاف را برای به دام انداختن نانوذرات ایفا می کنند. این تصاویر با بزرگنمایی های



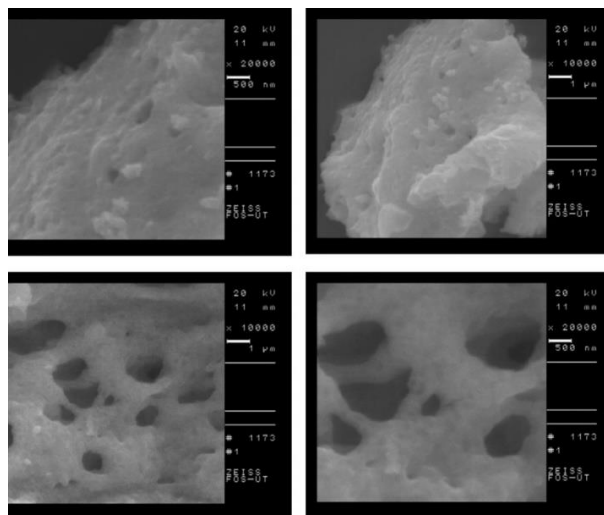
شکل ۴. طیف های UV الف:  $\text{Ni}_5\text{Cu}_5\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{GO}$ ، ب:  $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{GO}$ ، ج:  $\text{Ni}_3\text{Cu}_7\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{GO}$ ، د:  $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{GO}$  و  $\text{Ni}_7\text{Cu}_3\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{GO}$

در شکل ۵ طیف FTIR نمونه ها آمده است. همان طور که در تصاویر مشخص است، مقیاس محورهای عمودی متفاوت است که این موضوع به دلیل متغیر بودن ضخامت لایه هاست. پیک هایی که در محدوده کمتر از ۱۰۰۰  $\text{cm}^{-1}$  وجود دارند مربوط به مد ارتعاشی - کششی یون های دو ظرفیتی نیکل و مس در مکان چهار وجهی شبکه با اکسیژن است و همچنین مربوط به نوسان های کششی آهن در

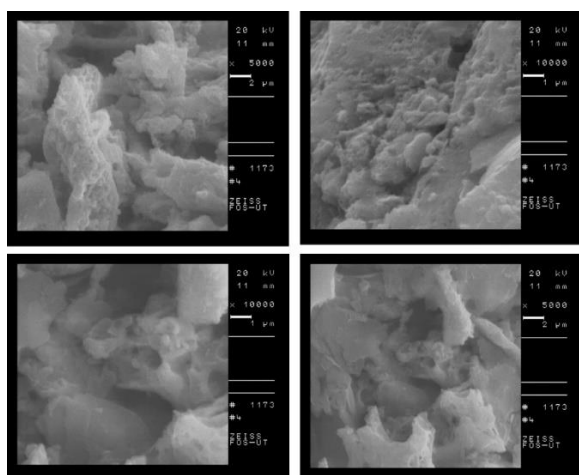
مختلفی گرفته شده تا کل نمونه، مورفولوژی و نحوه آرایش آن‌ها مشاهده شوند.



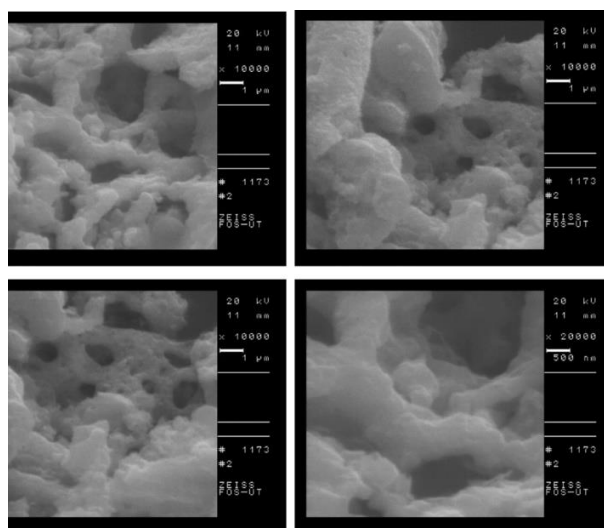
شکل ۸. تصاویر FESEM از  $Ni_7Cu_3Fe_2O_4/GO$



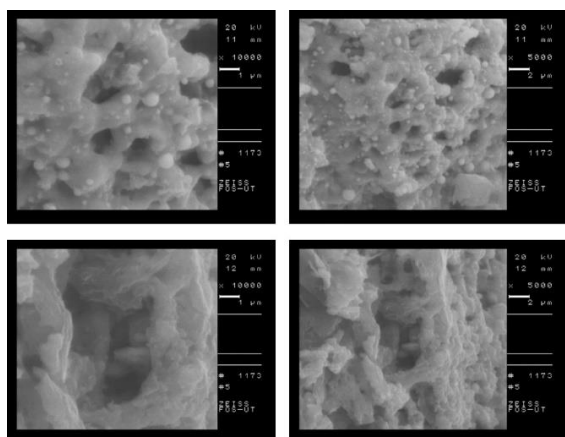
شکل ۶. تصاویر FESEM از  $NiFe_2O_4/GO$



شکل ۹. تصاویر FESEM از  $Ni_5Cu_5Fe_2O_4/GO$

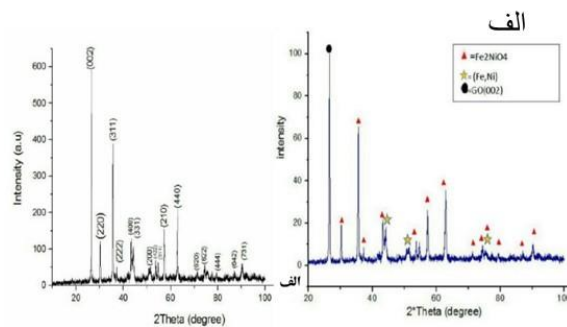
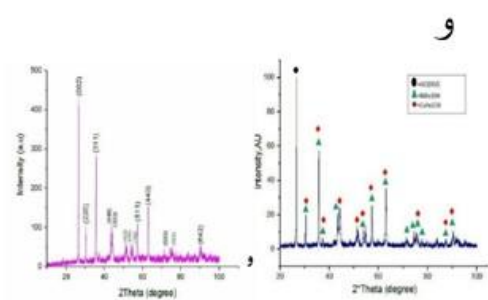
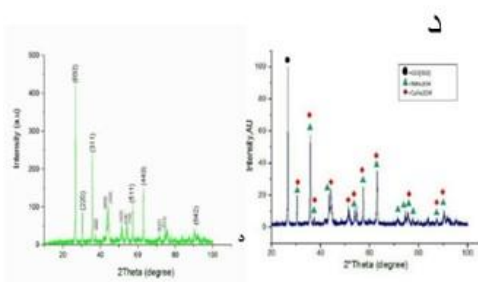
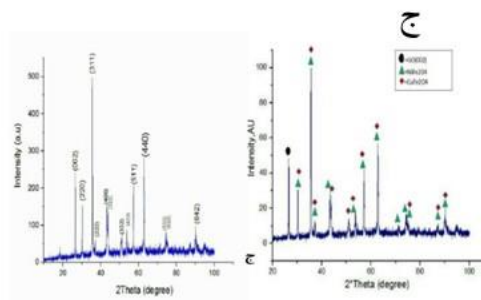


شکل ۷. تصاویر FESEM از  $CuFe_2O_4/GO$



شکل ۱۰. تصاویر FESEM از  $Ni_3Cu_7Fe_2O_4/GO$

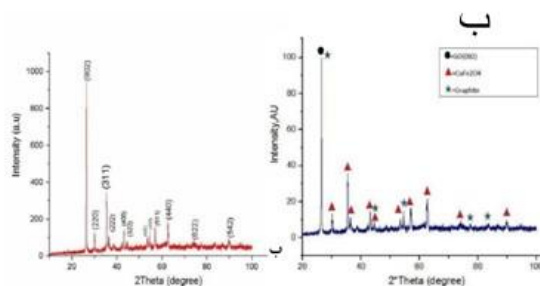
خواص اولیه نانو کامپوزیت‌های ساخته شده، توسط پراش اشعه‌ی ایکس با استفاده از اشعه‌ی ایکس XRD تحت زوایای ۵ تا ۱۰۰ درجه با گام‌های ۰/۰۲ بررسی شد. پیک‌هایی که در نمونه‌ها مشخص شده است، مربوط به ساختار اسپینل مکعبی است که به گروه فضایی  $Fd3m$  تعلق دارند. پیک بزرگی که در ۲۶ درجه در تمام نمونه‌ها وجود دارد، مربوط به بازتاب از صفحه‌ی (۰۰۲) است که مربوط به حضور لایه‌های گرافن با ساختار  $Sp^2$  در نمونه‌ها است. در شکل ۱۱ (الف-و) منحنی پلات‌های XRD نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. در پلات‌های سمت چپ شکل ۱۱، اندیس‌های میلر صفحات پراش براگ مشخص شده است و در پلات‌های سمت راست شکل ۱۱، نوع ماده یا ترکیبات موجود در نمونه‌ها آمده است.



شکل ۱۱. طیف‌های پراش الف:  $NiFe_2O_4$ .

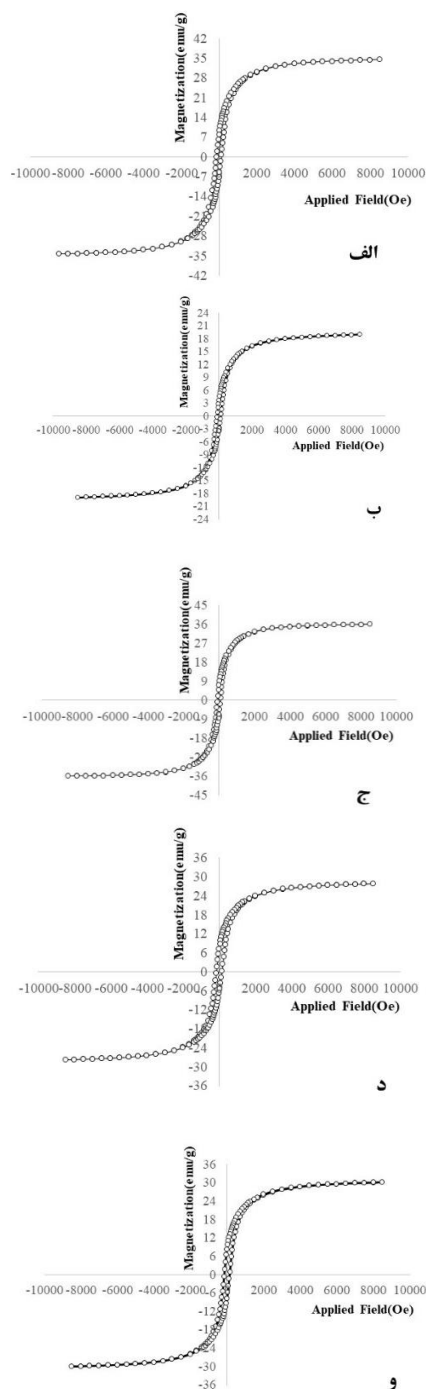
ب:  $CuFe_2O_4/GO$ ، ج:  $Ni_7Cu_3Fe_2O_4/GO$ .

د:  $Ni_5Cu_5Fe_2O_4/GO$  و:  $Ni_3Cu_7Fe_2O_4/GO$ .



در نمودار شکل ۱۱ ب، بیشترین مقدار گرافن و در شکل ۱۱ ج کمترین مقدار گرافن دیده شد. همچنین در نمودار شکل ۱۱ ب اندکی گرافیت نیز مشاهده شد. این در حالی است که در سایر نمونه‌ها هیچ اثری از گرافیت نیست. اندازه‌ی کریستال‌ها در کامپوزیت‌های مختلف با استفاده از فرمول دبای-شرر  $D = k\lambda / \beta \cos \theta$  محاسبه شده است که در این رابطه  $k$  عامل شکلی است و مقدار آن ۰/۹ است.  $\lambda$  هم طول موج اشعه‌ی ایکس می باشد که مقدار آن ۱/۵۴ انگستروم است.  $\beta$  متوسط پهنای کل در نصف

که در جدول ۲ مشخص است حضور یون‌های مس باعث کاهش در مغناطش اشباع می‌شود که این ناشی از این حقیقت است که گشتاور دو قطبی مغناطیسی یون‌های مس، نصف یون‌های نیکل است.



شکل ۱۲. حلقه‌های پسماند نمونه‌ها الف:  $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{GO}$ .

ب:  $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{GO}$  ج:  $\text{Ni}_7\text{Cu}_3\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{GO}$

د:  $\text{Ni}_3\text{Cu}_7\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{GO}$  و:  $\text{Ni}_5\text{Cu}_5\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{GO}$

ماکزیمم‌ها در تمام پیک‌های یک نمونه می‌باشد و مقدار آن بر حسب رادیان می‌باشد و همچنین  $\theta$  زاویه‌ی براگ از صفحات پراش است. در جدول 1 نتایج حاصل برای اندازه‌ی کریستال‌ها آمده است.

جدول ۱. اندازه نانو بلورک نمونه‌ها. فارسی نویسی اعداد جدول

D(A°)	2θ(deg)	β(rad)	sample
۵۴۰	۲۶.۵۴	۰/۰۰۳۵	$\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{GO}$
۴۹۶	۲۶.۴۸	۰/۰۰۳۸	$\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{GO}$
۳۸۴	۳۵.۶	۰/۰۰۳۸	$\text{Ni}_7\text{Cu}_3\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{GO}$
۶۸۰	۲۶.۶۸	۰/۰۰۲۸	$\text{Ni}_5\text{Cu}_5\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{GO}$
۶۸۰	۲۶.۶۲	۰/۰۰۲۸	$\text{Ni}_3\text{Cu}_7\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{GO}$

در شکل ۱۲ (الف و ج) حلقه‌های مغناطیسی پسماند نمونه‌ها در دمای اتاق نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است به محض اعمال میدان مغناطیسی، مغناطش ترکیبات افزایش پیدا کرده است و این افزایش مغناطش تا جایی ادامه پیدا می‌کند که به مقدار اشباع خود رسیده و دیگر با افزایش میدان مغناطیسی این مقدار اشباع افزایش نمی‌یابد. در ادامه اگر میدان مغناطیسی را به آرامی کم کنیم، ملاحظه می‌شود در جایی که میدان مغناطیسی صفر است، دیگر مغناطش صفر نمی‌شود (مغناطش پسماند) که این ناشی از ناهمسانگردی مغناطیسی در محیط است (مقداری انرژی در خود ذخیره می‌کند). حال اگر میدان مغناطیسی را باز هم کم کنیم و به مقادیر منفی سوق دهیم (جهت میدان را تغییر دهیم)، دیده می‌شود که سرانجام در یک میدان مغناطیسی خاص، مغناطش صفر می‌شود (وادارندگی). وجود پسماندها و وادارندگی نمونه‌ها نشان می‌دهد که مواد در این کار فرومغناطیس هستند.

در جدول ۲ اشباع مغناطیسی ( $M_s$ )، مغناطش پسماند ( $M_r$ ) و وادارندگی ( $H_c$ ) نمونه‌ها استخراج شده است. همان‌طور



توجه به نحوه‌ی قرارگیری یون‌های مس و نیکل در جایگاه‌های چهاروهشت وجهی ارتباط دارد.

جدول ۲. اشباع مغناطیسی ( $M_s$ )، مغناطش پسماند ( $M_r$ ) و وادارندگی ( $H_c$ ) نمونه‌ها (فارسی نویسی اعداد جدول)

Hc(Oe)	$M_r$ (emu/g)	$M_s$ (emu/g)	sample
۱۱۹/۹۹	۷/۷۸	۳۴/۴	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /GO
۱۲۱/۷۱	۴/۲	۱۸/۹۳	CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /GO
۸۸/۶۵	۷/۲۳	۳۶/۰۳	Ni <sub>۰.۷</sub> Cu <sub>۰.۳</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /GO
۱۱۸/۹۷	۷/۲۶	۲۷/۸۰	Ni <sub>۰.۵</sub> Cu <sub>۰.۵</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /GO
۱۲۲/۱۵	۸/۲۲	۳۰/۰۵	Ni <sub>۰.۳</sub> Cu <sub>۰.۷</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /GO

#### مراجع

1. R.Reitz, J.Milford, and W.Christy, *Foundation of Electromagnetic Theory*, Fourth Edition, (1993).
2. E.P.Wolfarth, *Handbook of Magnetic Materials Volume 2*, North-Holland, Publishing Company, (1982).
3. S.Chauhan, C.Ojha, and A.K.Shrivastava, *Synthesis and characterization of CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles*, International Journal of Theoretical and Applied Sciences, 1 (2009) 9-11.
4. O. Akhavan, A. Meidanchi, E. Ghaderi, and S. Khoei, *Zinc ferrite spinel-graphene in magneto-photothermal therapy of cancer*, J. Mater. Chem. B, 2 (2014) 3306-3314.
5. R.Hergt, S.Dutz, R.Müller, and M.Zeisberger, *magnetic particle hyperthermia: nanoparticle magnetism and materials development for cancer therapy*, J.Phys.:Condense. Matter, 18 (2006) S2919-S2934.
6. L.M. Viculis, J. J. Mack, O.M. Mayer, H. T. Hahn, and R. B. Kaner, *Intercalation and exfoliation routes to graphite nanoplatelets*, Journal of Materials Chemistry, 15(2005)974-978.
7. Y.L. Jiao, L. Zhang, X. R. Wang, G. Diankov, and H. J. Dai, *Narrow graphene nanoribbons from carbon nanotubes*, Nature, 458(2009)877.
8. K. Gajewski, S. Goniszewski, A. Szumska, M. Mocza, P. Kunicki, J.Gallop, N.Klein, L. Hao, and T. Gotszalk, *Raman Spectroscopy and Kelvin Probe Force Microscopy characteristics of the CVD suspended graphene*, Diamond and Related Materials 64(2016)27-33.
9. M. Saravanan, and T.C. Sabari Girisun, *Enhanced nonlinear optical absorption and optical limiting properties of superparamagnetic spinel zinc ferrite decorated reduced graphene oxide nanostructures*, Applied Surface Science, 392 (2017) 904-911.

#### نتیجه‌گیری

در این پژوهش نانو کامپوزیت‌های فریت نیکل - مس بر پایه گرافن توسط ترکیبی از روش احتراقی و روش لایه برداری از فاز مایع سنتز شد. با کنترل یون‌های Ni<sup>2+</sup> و گرافن، می‌توان خواص فیزیکی نانوکامپوزیت‌ها را کنترل کرد. این عمل، منجر به کاربردهای بالقوه از محصولات در بسیاری از زمینه‌ها از قبیل حسگرها، کشف مواد مخدر و MRI می‌شود. با توجه به الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌ها، حضور قله‌های واضح پراش اشعه ایکس متناظر با صفحات اصلی بازتاب براگ، تشکیل نانوذرات با ساختار اسپینل مکعبی را آشکار می‌کنند و همچنین تشکیل فاز فریت با توجه به نتایج FTIR مربوط به مد ارتعاشی یون‌های Fe واقع در مکان چهار وجهی شبکه با اکسیژن نیز قابل تایید است. موادی که با روش احتراقی تولید می‌شوند بسیار متخلخل و در نتیجه مساحت سطحی بزرگی دارند که در تصاویر مربوط به FESEM مشخص است. این تخلخل‌ها ناشی از خروج حجم زیادی از گازها در حین فرایند می‌باشد. در آنالیز VSM هم به خوبی مشخص شده است که افزودن Cu باعث کاهش اشباع مغناطیسی می‌شود و افزودن Ni در افزایش اشباع مغناطیسی نقش بسزایی دارد. که این تغییرات با